

Influence de différences interaurales de temps sur la sonie de sons purs en basse fréquence

V. Koehl et M. Paquier

UBO, Lab-STICC UMR CNRS 6285, 6 avenue Victor Le Gorgeu, CS 93837, 29238 Brest Cedex 3, France
vincent.koehl@univ-brest.fr

La sonie directionnelle est un phénomène se traduisant par une variation de l'intensité sonore perçue en fonction de la localisation de la source. Celui-ci a été essentiellement observé en hautes fréquences, pour des sources localisées dans le plan horizontal, où l'ombre acoustique de la tête de l'auditeur modifie la pression sonore aux oreilles droite et gauche. Ces modifications physiques sont fonction de l'azimut de la source et se répercutent alors sur la sonie qui est issue d'un processus de sommation binaurale. Par ailleurs, des variations significatives de la sonie avec l'azimut de la source ont été observées dès 400 Hz, où les effets d'ombre sont pourtant considérés comme faibles. On peut alors supposer que ce phénomène n'est pas causé uniquement par les modifications physiques subies par les pressions aux oreilles, mais aussi par d'autres paramètres liés au processus de localisation. Le but de cette étude est d'observer la sonie de sons purs en basse fréquence ($f \leq 500$ Hz) latéralisés (au casque) uniquement par des différences interaurales de temps (pas de différences interaurales de niveau). Un test d'égalisation de sonie montre qu'à faible niveau (40 phon) celle-ci varie de manière significative en fonction de ces différences de temps : un son dont la différence interaurale de temps correspondait à un azimut virtuel de $\pm 90^\circ$ était perçu significativement plus fort qu'un son de référence (sans différence de temps) présenté au même niveau physique. Le phénomène de sonie directionnelle apparaît donc comme n'étant pas dû uniquement aux niveaux physiques aux oreilles bien que l'effet des seules différences de temps ne soit pas significatif à niveau moyen (70 phon) ou au seuil d'audition.

1 Introduction

La sonie liée à un stimulus auditif peut varier selon la direction de la source sonore. Ce phénomène a pu être observé en diffusant des bandes de bruit sur des haut-parleurs disposés tout autour de l'auditeur dans une chambre anéchoïque [1, 2]. À titre d'exemple, un bruit de largeur de bande égale à un tiers d'octave centré à 5 kHz est perçu plus fort si sa source émettrice se trouve sur le côté de l'auditeur ($\pm 90^\circ$) plutôt que dans son axe (0°). Cet effet, appelé sonie directionnelle, s'explique largement par les modifications physiques que subissent les ondes sonores dans leurs trajets jusqu'aux entrées des conduits auditifs externes. Les pressions sonores s'appliquant à chacune des deux oreilles sont affectées de différentes manières selon l'azimut de la source et la sonie, résultant d'un processus de sommation binaurale [3], est affectée elle aussi. Ainsi, cet effet a été majoritairement observé en hautes fréquences, où les pressions sonores aux oreilles de l'auditeur sont modifiées du fait de la présence de la tête. Par ailleurs, la différence interaurale de niveau (ou ILD pour Interaural Level Difference) résultante est utilisée comme indice de localisation pour les fréquences supérieures à 1500 Hz [4]. Le modèle détaillé par la norme ANSI S3.4 [5], et qui fait actuellement référence pour l'estimation de la sonie des signaux stationnaires, prend implicitement les effets directionnels en compte puisqu'il se base sur des mesures de pression aux oreilles droite et gauche qui peuvent varier selon la direction de la source. Cependant, de récentes études [2, 6] recommandent une prise en compte plus explicite de la localisation de la source dans les modèles de sonie.

Sivonen et Ellermeier [2] ont observé des variations de la sonie en fonction de l'azimut dès 400 Hz. Il est pourtant généralement admis que l'ombre acoustique de la tête d'un auditeur est faible voir négligeable pour des fréquences inférieures à 500 Hz [4], en conséquence de quoi les différences interaurales de niveau sont négligeables pour des sources distantes. Sivonen et Ellermeier [2] ont néanmoins observé que la différence entre les niveaux de pression mesurés sur chaque oreille pouvaient atteindre jusqu'à 5 dB à 400 Hz pour un azimut de $\pm 90^\circ$. De plus, sur un de leurs sujets (huit en tout), ces différences interaurales de niveau ne suffisent pas à expliquer les variations de la sonie en fonction de l'azimut. Moore et Glasberg [6] ont également remarqué que les prédictions effectuées par leur modèle à partir des mesures de Sivonen et Ellermeier à 5000 Hz

étaient inférieures à la sonie estimée par les huit auditeurs. Ainsi, que l'on puisse considérer ou non que les pressions sur chaque oreille sont les mêmes, on peut suspecter que celles-ci ne sont pas seules responsables du phénomène de sonie directionnelle mais que d'autres paramètres liés à la localisation de la source sont également impliqués. De tels effets pourraient même avoir lieu dès le seuil d'audition comme le suggèrent les valeurs sous différentes incidences indiquées dans les normes pour tests audiométriques [7, 8]. Par exemple, les données indiquent une légère décroissance du seuil monaural d'audition en champ libre en augmentant l'incidence de la source entre 0° et 90° à 125 Hz.

La localisation en basse fréquence étant basée sur la différence interaurale de temps (ou ITD pour Interaural Time Difference), le but de la présente étude est d'observer les possibles effets des différences interaurales de temps sur la perception de la sonie pour des sons purs en basse fréquence ($f \leq 500$ Hz). Des différences de temps ont ainsi été introduites sur des stimuli présentés au casque, permettant d'être assuré de produire la même pression acoustique sur chaque oreille. L'effet de l'ITD sur la sonie a été observé à différents niveaux absolus car la sommation binaurale est dépendante du niveau de présentation. Le gain binaural apporté par une présentation diotique plutôt que monotique est de l'ordre de 3 dB au seuil d'audition [9] et augmente jusqu'à 10 dB à forts niveaux [10, 11]. En prenant ces considérations en compte, l'effet de l'ITD sur la sonie a été étudié à niveau sonore faible (40 phon) et moyen (70 phon), ainsi qu'au seuil d'audition. L'effet de l'ITD à niveau supraliminaire a été étudié en égalisant en sonie des signaux dichotiques (obtenus en introduisant de l'ITD) avec une référence diotique (sans différence interaurale). À niveau liminaire, cet effet a été observé en mesurant les seuils d'audition des signaux dichotiques.

2 Latéralisation par différence de temps

L'étude de l'audition binaurale au casque permet de faire varier un paramètre interaural indépendamment de l'autre. Des différences interaurales de temps ont été introduites sur des sons purs en basse fréquence ($125 \text{ Hz} \leq f \leq 500 \text{ Hz}$) en maintenant les pressions sur chaque oreille égales. Les stimuli étaient ainsi "latéralisés" [12] par différences de temps uniquement. La latéralisation de sons purs peut être

obtenue par la seule différence interaurale de temps jusqu'à 1500 Hz [13].

Les différences interaurales de temps ont été calculées pour différentes incidences virtuelles θ_{inc} d'après un modèle basse fréquence [14] valide jusqu'à 500 Hz :

$$ITD = \frac{3a}{c_0} \sin \theta_{inc} \quad (1)$$

où $a = 8,75$ cm désigne le rayon standard de la tête et $c_0 = 340$ m · s⁻¹ la vitesse du son dans l'air. Les différences interaurales obtenues ainsi ont été introduites entre les canaux droit et gauche de sons purs initialement diotique. Une ITD négative signifie que le stimulus est latéralisé vers la gauche. Les stimuli latéralisés ont été présentés aux auditeurs sur un casque Sennheiser HD650 (circum-aural ouvert). Pour les deux expériences décrites ci-dessous, la durée de chaque stimulus a été fixée à 1,6 s, une rampe sinusoïdale de 100 ms étant appliquée à son attaque et à son extinction. Dans le cas de stimuli similaires, la latéralisation par seules différences de temps s'est traduite par une bonne localisation [13].

3 Expérience I : égalisation de sonie

L'effet de différences interaurales de temps sur la sonie à niveau supraliminaire a été étudié en égalisant subjectivement des sons purs latéralisés avec une référence frontale (diotique) de même fréquence.

3.1 Stimuli

Des sons purs de fréquence :

- 400 Hz, où des effets de sonie directionnelle ont été observés sur des bruits de largeur de bande égale au tiers d'octave [2],
- 200 Hz, où les pressions à droite et à gauche doivent être naturellement égales quels que soient l'auditeur et l'azimut [15],

ont été latéralisés en introduisant des différences interaurales de temps calculées selon l'Eq. (1). Sept incidences virtuelles θ_{inc} (0°, ±30°, ±60° and ±90°) ont été choisies afin d'étudier une possible asymétrie des effets directionnels. Les valeurs d'ITD correspondantes (Tableau 1) sont supérieures au seuil différentiel de temps/phase à ces fréquences et permet donc la latéralisation de ces sons purs [12].

TABLEAU 1 – ITD en fonction de l'incidence θ_{inc} d'après l'Eq. (1) [14].

θ_{inc} (°)	ITD (μs)
0	0
±30	±386
±60	±669
±90	±772

De plus, le test d'égalisation de sonie a été effectué à deux niveaux de sonie N nominaux, 40 phon et 70 phon, afin d'observer les possibles non-linéarités du phénomène. Le niveau des signaux a donc été réglé à 40 ou 70 phon en positionnant le casque de test sur une tête artificielle (Neumann KU100) et en ajustant le niveau de pression sonore (Tableau 2) à l'entrée du conduit auditif selon la norme ISO 226 [16].

TABLEAU 2 – Niveau de pression L en dBSPL en fonction du niveau de sonie N et de la fréquence f , d'après la norme ISO 226 [16].

N (phon)	f (Hz)	L (dBSPL)
40	200	53,4
40	400	45,0
70	200	77,9
70	400	72,6

Ainsi, 28 stimuli (7 ITD, 2 fréquences et 2 niveaux nominaux) ont été égalisés en sonie sur leurs références frontales respectives.

3.2 Procédure

Les égalisations de sonie ont été obtenues selon une procédure adaptative à 2 intervalles à choix forcé (2AFC [2]) suivant une règle "1-up 1-down" convergeant vers le point d'égalité subjective (sonie égale). À chaque essai, un son test et un son de référence de durée 1,6 s chacun ont été présentés de manière aléatoire et séparés par une pause de 500 ms. La tâche du sujet consistait à indiquer lequel de ces deux sons était perçu comme le plus fort, indépendamment de toute autre différence qu'il pourrait percevoir.

Le niveau de départ de chaque stimulus à égaliser a été aléatoirement fixé 10 dB au-dessus ou en -dessous du niveau de la référence (Tableau 2), de manière à produire des différences de sonie clairement perceptibles au début de la tâche d'égalisation. Le niveau du son test, contrôlé par la procédure adaptative, était diminué d'une certaine valeur si l'auditeur l'avait jugé plus fort que la référence et diminué de la même valeur si l'auditeur l'avait jugé plus faible. Le pas a été initialement fixé à 4 dB, puis réduit à 1 dB après deux inversions (changement de direction dans la procédure d'égalisation). La sonie égalisée était obtenue après huit inversions, le point d'égalité subjective étant la moyenne des six dernières. La procédure complète d'égalisation d'un son test, démarrant à ±10 dB autour du niveau de référence et s'arrêtant à la huitième inversion, sera désignée par "séquence adaptative" dans la suite de cet article.

Les deux niveaux de référence (40 et 70 phon) sur lesquels les stimuli devaient être égalisés ont donné lieu à deux sessions distinctes, afin de permettre aux sujets d'effectuer des comparaisons dans des plages de sonie restreintes. Les 14 conditions expérimentales (7 ITD et 2 fréquences) correspondant à chaque niveau de référence ont été aléatoirement numérotées de 1 à 14. Afin d'éviter toute stratégie de réponse, les 14 séquences adaptatives ont

ensuite été intercalées essai par essai afin de mélanger les ITD, fréquences et niveaux de départ. Du point de vue du sujet, chaque session est ainsi apparue comme une suite de comparaisons par paire sans rapport les unes avec les autres. Afin de réduire la fatigue de l'auditeur en fin de session, où les comparaisons par paires concernent spécifiquement de faibles différences de niveau, seules les séquences adaptatives portant un numéro impair (aléatoirement attribué en début de session) étaient initialement démarrées. Les séquences adaptatives portant un numéro pair ne démarraient qu'après que toutes les séquences impaires aient passé leur quatrième inversion, afin que l'auditeur ne soit pas confronté aux dernières inversions (comparaison sur de petites différences de sonie) des 14 séquences à la fois.

Le test, consistant en deux sessions (40 et 70 phon) proposées aléatoirement, s'est déroulé dans une cabine audiométrique. Le sujet avait pour consigne initiale de placer confortablement le casque HD650 sur ses oreilles et de ne pas modifier cette position une fois l'expérience démarrée. Afin de prendre en compte la variabilité individuelle des mesures, chaque auditeur a passé le test deux fois, sur deux jours différents. La première session d'un test était précédée d'un pré-test de 3 min afin de laisser le sujet se familiariser avec la tâche et l'interface de réponse. À la fin de la première session, une pause de 5 min était proposée au sujet, avec la consigne explicite de ne pas retirer le casque. Le test, à savoir les deux sessions incluant pré-test et pause, a duré en moyenne environ 1 h. Onze étudiants ingénieurs du son de l'Université de Brest (Licence Image & Son) ont participé à cette expérience pour laquelle ils ont été rémunérés. Les sujets (2 femmes et 9 hommes) présentaient des seuils d'audition normaux d'après un audiogramme passé dans le mois précédant le test. Aucun d'eux n'avait d'expérience particulière des tests auditifs en laboratoire.

3.3 Résultats

Des analyses de la variance à mesures répétées ont été effectuées pour évaluer les effets des facteurs :

- T : test (2 niveaux),
- f : fréquence (2 niveaux),
- ITD : différence interaurale de temps (7 niveaux),

et de leurs possibles interactions sur les égalisations de sonie à chaque niveau de niveau de référence (40 et 70 phon). Le point d'égalité subjective est ici décrit par la différence entre le niveau égalisé et le niveau de référence (voir Tableau 2 pour les valeurs en dBSPL correspondantes).

À 40 phon, et comme indiqué dans le Tableau 3, seule l'ITD a eu un effet significatif ($F(6, 60) = 9,398$; $p < 0,001$) sur les égalisations de sonie. Le point d'égalité subjective varie alors significativement avec ce facteur. Le test LSD de Fisher indique que les stimuli possédant une différence interaurale de $\pm 772 \mu\text{s}$, correspondant à un azimuth virtuel de $\pm 90^\circ$ selon le modèle de Kuhn [14], ont été égalisés à un niveau significativement ($p < 0,001$) moins fort que les stimuli d'ITD nulle. Comme illustré par la Figure 1, le point d'égalité subjective a été obtenu pour un niveau inférieur de 1,25 dB inférieur au niveau de la référence. Cette différence apparaît relativement faible mais est néanmoins supérieure au seuil différentiel pour des sons purs de fréquences 200 ou 400 Hz à 40 phon [17]. Comme le

point d'égalité subjective a été obtenu à un niveau moindre pour les stimuli d'ITD = $\pm 772 \mu\text{s}$, on peut en déduire ces stimuli seraient perçus comme plus forts que la référence si présentés au même niveau.

TABLEAU 3 – Résultats de l'analyse de la variance à mesures répétées sur les égalisations de sonie à 40 phon.

Facteur	SC	DL	MC	F	p
T	3,64	1	3,64	1,368	0,269
f	0,04	1	0,04	0,012	0,914
ITD	70,14	6	11,69	9,398	$< 0,001^{***}$
$T \times f$	1,45	1	1,45	1,175	0,304
$T \times \text{ITD}$	14,33	6	2,39	1,266	0,287
$f \times \text{ITD}$	13,97	6	2,33	0,906	0,497
$T \times f \times \text{ITD}$	11,10	6	1,85	0,857	0,534

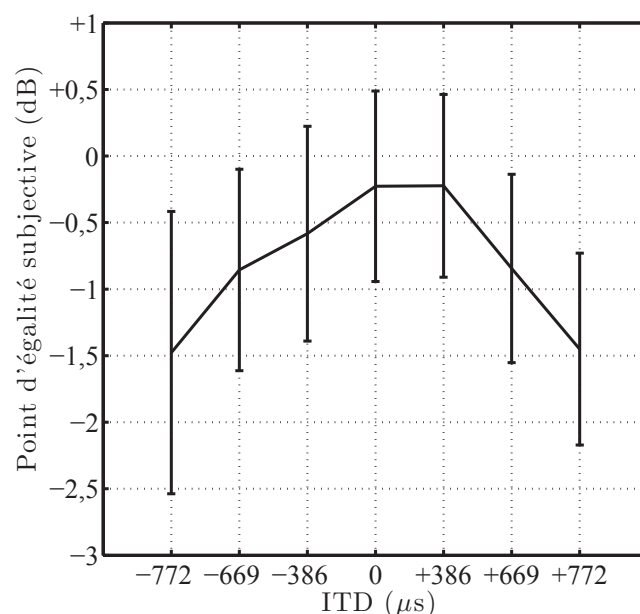


FIGURE 1 – Point d'égalité subjective (dans son intervalle de confiance à 95%) obtenu pour des sons purs (200 et 400 Hz) à 40 phon, en fonction de l'ITD.

À 70 phon, l'ITD n'a pas eu d'effet significatif (voir Tableau 4) sur les égalisations de sonie. Ainsi, le point d'égalité subjective a ainsi été atteint à des valeurs statistiquement équivalentes pour toutes les valeurs d'ITD proposées (voir Figure 2). En revanche, la fréquence a eu un effet significatif sur les égalisations de sonie ($F(1, 10) = 7,941$; $p < 0,05$). Le point d'égalité subjective varie donc de manière significative avec la fréquence (200 Hz et 400 Hz) des stimuli. Cependant, la comparaison des moyennes obtenues à 200 et à 400 Hz ne révèle qu'une différence de 0,2 dB, qui ne devrait pas permettre de percevoir une différence de sonie entre de tels sons purs [17]. La significativité de cet effet ne peut, à ce stade, qu'être

imputée à un nombre de sujets relativement faible.

TABLEAU 4 – Résultats de l’analyse de la variance à mesures répétées sur les égalisations de sonie à 70 phon.

Facteur	SC	DL	MC	<i>F</i>	<i>p</i>
T	1,07	1	1,07	1,532	0,244
<i>f</i>	3,29	1	3,29	7,941	0,018*
ITD	5,68	6	0,95	2,218	0,053
$T \times f$	0,06	1	0,06	0,051	0,826
$T \times \text{ITD}$	3,69	6	0,62	1,088	0,380
$f \times \text{ITD}$	2,96	6	0,49	0,713	0,641
$T \times f \times \text{ITD}$	4,00	6	0,67	1,085	0,382

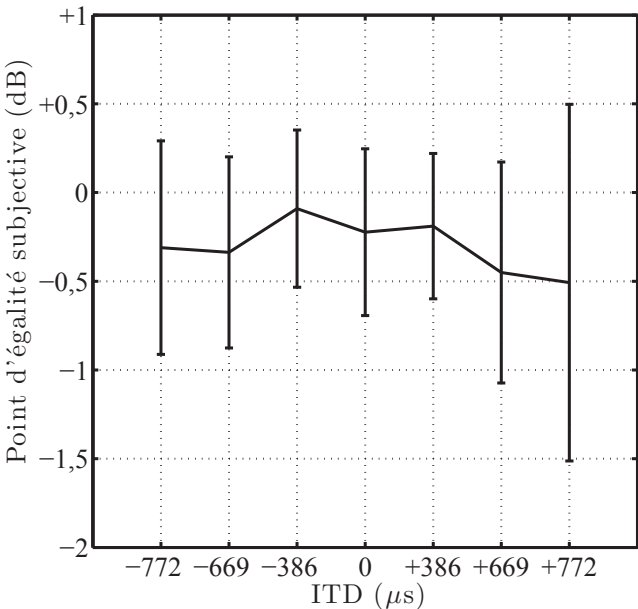


FIGURE 2 – Point d’égalité subjective (dans son intervalle de confiance à 95%) obtenu pour des sons purs (200 et 400 Hz) à 70 phon, en fonction de l’ITD.

4 Expérience II : mesure du seuil d’audition

L’effet de différences interaurales de temps sur la sonie à niveau liminaire a été étudié en mesurant le seuil d’audition de sons purs latéralisés.

4.1 Stimuli

À nouveau, des sons purs de fréquence :

- 200 et 400 Hz, où la sonie varie significativement en fonction de l’ITD d’après l’Expérience I (à un niveau de référence de 40 phon),

- 125, 250 et 500 Hz qui sont les fréquences centrales des octaves encadrant les deux précédentes et auxquelles les tests audiométriques sont classiquement effectués,

ont été latéralisés en introduisant les différences interaurales de temps calculées selon l’Eq. (1) contenues dans Tableau 1. Seules les quatre valeurs d’ITD nulle ou positives parmi les sept initiales ont été conservées puisque l’Expérience I n’a pas révélé d’effet asymétrique. Les trois valeurs strictement positives sont supérieures au seuil différentiel de temps/phase à ces fréquences [12] et permet donc la latéralisation de ces sons purs [13]. Le casque de test (HD650) a été calibré selon la même procédure que dans l’Expérience I, en appliquant à l’entrée du conduit auditif le niveau de pression sonore correspondant au seuil d’audition normalisé [16] et indiqué dans le Tableau 5 pour chaque fréquence testée. Ainsi, les seuils d’audition de 20 stimuli (4 ITD, 5 fréquences) ont été mesurés.

TABLEAU 5 – Niveau de pression *L* en dB SPL au seuil d’audition en fonction de la fréquence *f*, d’après la norme ISO 226 [16].

<i>f</i> (Hz)	<i>L</i> (dB SPL)
125	22,0
200	14,5
250	11,0
400	6,0
500	4,0

4.2 Procédure

Les seuils d’audition ont été mesurés en adaptant [18] une procédure normalisée [19]. La mesure d’un seuil a été effectuée en présentant des sons purs de durée 1,6 s dont le niveau était supérieur de 50 dB au seuil indiqué dans le Tableau 5. Après chaque présentation, l’auditeur devait indiquer s’il avait perçu le son ou non. Le niveau du stimulus était alors décrémenté en cas de réponse positive, incrémenté en cas de réponse négative. Les pas de décrément et incrément étaient progressivement réduits au cours de la procédure, afin d’augmenter la précision de mesure jusqu’à une résolution de 1 dB. Initialement, le niveau était décrémenté de 10 dB et incrémenté de 5 dB afin d’encadrer rapidement le seuil dans un intervalle de 10 dB. Le décrément était ensuite réduit à 5 dB et l’incrément à 2 dB après deux inversions (changement de direction dans la procédure de mesure). Puis, après deux inversions supplémentaires (quatre inversions en tout), le décrément était finalement réduit à 2 dB et l’incrément à 1 dB. Le seuil a donc été mesuré selon une règle “1-up 2-down” et défini, après huit inversions au moins, au niveau produisant une réponse positive identique à l’une des deux réponses positives précédentes.

Comme pour l’Expérience I, l’auditeur était assis dans une cabine audiométrique et avait pour consigne initiale de

placer confortablement le casque sur ses oreilles et de ne pas modifier cette position une fois le test commencé. À nouveau, chaque auditeur a passé le test deux fois, sur deux jours différents, afin de prendre en compte la variabilité individuelle des mesures. Le test durait en moyenne 45 min et était précédé d'un pré-test de 3 min afin de laisser le sujet se familiariser avec la tâche et l'interface de réponse. Quinze étudiants ingénieurs du son de l'Université de Brest (Licence et Master Image & Son) ont participé à cette expérience pour laquelle ils ont été rémunérés. Les sujets (5 femmes et 10 hommes) présentaient des seuils d'audition normaux d'après un audiogramme passé dans le mois précédant le test. Aucun d'eux n'avait d'expérience particulière des tests auditifs en laboratoire.

4.3 Résultats

Les seuils individuels ont tout d'abord été normalisés par fréquence de manière à ce que le seuil moyen pour chacune des 5 fréquences testées soit de 0 dB. Une analyse de la variance à mesures répétées a ensuite été effectuée pour évaluer les effets des facteurs :

- T : test (2 niveaux),
- f : fréquence (5 niveaux),
- ITD : différence interaurale de temps (4 niveaux),

et de leurs possibles interactions sur les mesures de seuil.

Comme indiqué par le Tableau 6, l'effet simple de l'ITD et ses interactions avec les autres facteurs ne se sont pas révélés significatifs. L'ITD n'a donc pas eu d'influence sur la mesure des seuils au cours de l'Expérience II.

TABLEAU 6 – Résultats de l'analyse de la variance à mesures répétées sur les mesures de seuil.

Facteur	SC	DL	MC	F	p
T	0,08	1	0,08	0,002	0,961
f	0,00	4	0,00	0,000	1,000
ITD	5,78	3	1,93	0,661	0,581
$T \times f$	1,19	4	0,30	0,040	0,997
$T \times \text{ITD}$	7,68	3	2,56	1,485	0,232
$f \times \text{ITD}$	58,71	12	4,89	1,555	0,109
$T \times f \times \text{ITD}$	63,14	12	5,26	1,769	0,057

5 Discussion

Les résultats obtenus à 40 phon montrent que des différences interaurales de temps peuvent engendrer des différences significatives de sonie. Ainsi, à faible niveau, des stimuli de fréquence 200 et 400 Hz latéralisés uniquement par de l'ITD seraient perçus significativement plus fort que des stimuli frontaux. Cependant, cet effet ne s'est pas

révélé significatif à niveau moyen (70 phon) ni au seuil d'audition. Les résultats à 40 et 70 phon sont comparables à des observations effectuées sur des sons purs présentés en phase (S_0) ou en opposition de phase (S_π) interaurale, en présence d'un bruit masquant en phase aux deux oreilles (N_0). Les signaux $N_0 S_\pi$ sont perçus significativement plus forts que les signaux $N_0 S_0$ à bas niveau, mais pas à moyen niveau [20]. Ainsi, la différence de phase interaurale due à une latéralisation pourrait, à faible niveau sonore, permettre d'extraire plus facilement les stimuli du bruit interne du système auditif et être ainsi responsable d'une augmentation significative de sonie, mais n'explique pas la constance des seuils lorsque l'ITD varie.

L'augmentation de la sonie avec l'ITD observée à 40 phon pourrait également être due à des processus de plus haut niveau tels que ceux mis en évidence dans la perception de la sonie en fonction de la distance [21]. Il apparaît que l'estimation de la sonie est influencée par la distance à laquelle la source est perçue. De tels processus pourraient également être mis en œuvre lorsqu'une latéralisation est perçue et agir de différente manière selon que la latéralisation permet une discrimination supplémentaire entre deux signaux ou non et selon le niveau absolu. Le rôle de ces processus de haut niveau n'est pas encore clairement établi, mais leur prise en compte est d'ores et déjà considérée comme une amélioration significative pour les modèles actuels [6].

6 Conclusion

Les résultats du test d'égalisation de sonie indiquent une augmentation significative de la sonie pour des sons purs (200 et 400 Hz) à faible niveau (40 phon) latéralisés par des différences interaurales de temps. Ce résultat confirme que le phénomène de sonie directionnelle ne serait pas dû qu'aux seules variations de pression aux deux oreilles en fonction de l'azimut, mais que d'autres paramètres (en l'occurrence l'ITD) liés à la localisation peuvent également influencer sur le processus de sommation de sonie binaurale. La manière dont l'ITD affecte ce processus n'est pas encore clairement établie, tout comme les raisons pour lesquelles cet effet ne s'est pas montré significatif à un niveau moyen (70 phon) ou au seuil d'audition. Néanmoins, l'effet significatif observé sur des sons purs de bas niveau met en évidence une influence de l'ITD sur la sonie et confirme le besoin d'une compréhension accrue de ce phénomène.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le personnel et les étudiants de la formation "Image & Son Brest" de l'Université de Bretagne Occidentale pour leur concours à cette étude.

Références

- [1] D. W. Robinson and L. S. Whittle, The loudness of directional sound fields, *Acustica* **10**, 74–80 (1960).
- [2] V. P. Sivonen and W. Ellermeier, Directional loudness in an anechoic sound field, head-related transfer functions,

- and binaural summation, *Journal of the Acoustical Society of America* **119**, 2965–2980 (2006).
- [3] M. Florentine, *Loudness*, Springer, New York City (2010).
- [4] B. C. J. Moore, *An introduction to the Psychology of Hearing*, Elsevier Academic Press, London (2003).
- [5] ANSI S3.4, *Procedure for the computation of loudness of steady sounds*, American National Standards Institute, New York City (2012).
- [6] B. C. J. Moore and B. R. Glasberg, Modeling binaural loudness, *Journal of the Acoustical Society of America* **121**, 1604–1612 (2007).
- [7] ANSI S3.6, *Specification for audiometers*, American National Standards Institute, New York City (2010).
- [8] ISO 8253–2, *Acoustics – Audiometric test methods – Part 2 : Sound field audiometry with pure-tone and narrow-band test signals*, International Organization for Standardization, Geneva (2009).
- [9] W. A. Shaw, E. B. Newman and I. J. Hirsh, The difference between monaural and binaural thresholds, *Journal of Experimental Psychology* **37**, 229–242 (1947).
- [10] G. S. Reynolds and S. S. Stevens, Binaural summation of loudness, *Journal of the Acoustical Society of America* **32**, 1337–1344 (1960).
- [11] R. P. Hellman and J. Zwislacki, Monaural loudness function at 1000 cps and interaural summation, *Journal of the Acoustical Society of America* **35**, 856–865 (1963).
- [12] W. A. Yost and G. Gourevitch, *Directional Hearing*, Springer, New York City (1987).
- [13] P. X. Zhang and W. M. Hartmann, Lateralization of sine tones–interaural time vs phase, *Journal of the Acoustical Society of America* **120**, 3471–3474 (2006).
- [14] G. F. Kuhn, Model for the interaural time differences in the azimuthal plane, *Journal of the Acoustical Society of America* **62**, 157–167 (1977).
- [15] W. E. Feddersen, T. T. Sandel, D. C. Teas and L. A. Jeffress, Localization of high-frequency tones, *Journal of the Acoustical Society of America* **29**, 988–991 (1957).
- [16] ISO 226, *Acoustics – Normal equal-loudness-level contours*, International Organization for Standardization, Geneva (2003).
- [17] H. Fletcher, *Speech and hearing in communication*, Van Nostrand, Princeton (1961).
- [18] M. Paquier, V. Koehl and B. Jantzen, Influence of headphone position in pure-tone audiometry, *Proceedings of Acoustics 2012 Conference*, 3925–3930, Nantes (2012).
- [19] ANSI S3.21, *Methods for manual pure-tone threshold audiometry*, American National Standards Institute, New York City (2009).
- [20] E. Zwicker and G. B. Henning, On the effect of interaural phase differences on loudness, *Hearing Research* **53**, 141–152 (1991).
- [21] P. Zahorik and F. L. Wightman, Loudness constancy with varying sound source distance, *Nature Neuroscience* **4**, 78–83 (2001).